

L'uso dei TLD nella mitigazione della risposta indotta dal vento su edifici alti: un caso studio

Tommaso Massai ^a, Gianni Bartoli ^a, Luca Facchini ^a

^aCRIACIV / DICeA (Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale)
Università degli Studi di Firenze

SOMMARIO

Nel presente lavoro viene presentata una procedura per la modellazione di un sistema di smorzamento a massa liquida per mitigare le vibrazioni indotte dal vento sugli edifici alti. La definizione dei parametri di progetto è basata sul modello di Housner, elaborato nell'ambito dell'ingegneria sismica per serbatoi di stoccaggio acqua. Data la differenza volumetrica fra tali serbatoi ed i contenitori di cui solitamente l'intero sistema di smorzamento è composto, è stata verificata l'accettabilità dell'approssimazione con un confronto sui parametri di sloshing forniti dalla trattazione analitica. La procedura è stata quindi utilizzata per valutare la risposta di un edificio alto sottoposto a prove su un modello in scala in galleria del vento. Un modello autoregressivo è stato utilizzato per l'estensione in frequenza dei segnali registrati in galleria. Sono stati analizzati quattro modelli del caso di studio, variabili nel fattore di massa dello smorzatore, più un modello con "detuning"; quest'ultimo, che si traduce in un sistema MDOF equivalente, è risultato il più efficiente, consentendo di raggiungere una mitigazione, in termini di accelerazione, in linea con i valori presenti nella letteratura di riferimento. Con un sistema relativamente semplice ed economico è possibile ottenere un abbattimento percentuale vicino al 50% delle vibrazioni indotte dal vento.

ABSTRACT

In the present paper, a possible procedure for modeling the damping properties of a building-liquid mass device system for wind-induced vibration on high-rise structures is introduced. The definition of the design parameters is based on the Housner model, developed in the sixties in the Seismic Engineering field to prevent the collapse of water storage tanks. Because of the difference in volume between the storage tanks and the damper devices tanks, that are usually used in such systems, a reliability analysis has been carried out to compare Housner and theoretical sloshing parameters. An auto-regressive model has been employed to extend, in the frequency domain, the wind tunnel data, recorded on a scale model. The procedure has been applied to a study case, for which four computational models of the structure, varying in the mass factor, have been developed. Furthermore a model with detuning on sloshing frequencies, that could be represented by a MDOF system, has been performed. Results of the analyses show that the latter is the most efficient, reaching values of mitigation levels, in terms of acceleration, comparable with the literature. It will be shown that such a simple and cheap system is able to reduce around the 50% of wind-induced vibration intensity.

PAROLE CHIAVE: smorzamento, edifici alti, TLD, detuning, controllo passivo, filtro autoregressivo.

1. INTRODUZIONE

L'odierna generazione di costruzioni (ponti, torri, strutture off-shore etc.) è caratterizzata da strutture sempre più leggere e flessibili, pertanto suscettibili alle forze esterne in generale e al vento in particolare. È importante porre l'accento sulla diversità che le forzanti naturali presentano rispetto alle caratteristiche spettrali: a frequenze minori di 1 Hz, i carichi indotti dal vento sono dominanti, mentre nell'intervallo 1 - 10 Hz è la forzante sismica a prendere il sopravvento (Kwok, 1991). Il contenuto energetico della risposta si concentra, per strutture alte, prevalentemente sul primo modo di vibrare. Secondo le varie normative in materia è necessario porre un limite alla risposta strutturale, solitamente in termini di accelerazione. In quest'ottica le strade per rispettare tali limiti sono generalmente due: variazioni nell'aerodinamica, che influenzano l'interazione fluido-struttura riducendo le forze, e dispositivi di smorzamento, atti a dissipare energia. Riferendoci alla seconda strada è possibile impiegare molte categorie diverse di smorzatori a seconda che siano attivi o passivi, a masse, ad attrito, viscosi, solo per citare alcune tipologie. Tra gli smorzatori passivi a massa, un tipo particolare prevede del liquido all'interno al contenitore, da qui il nome di TLD (Tuned Liquid Dampers).

1.1 *Tuned Liquid Dampers*

I TLD consistono in contenitori, parzialmente riempiti di liquido (generalmente acqua) che entra in oscillazione quando l'edificio cui sono collegati, inizia a vibrare. I TLD sfruttano l'effetto del moto d'onda che, se accordato sulla frequenza dominante di una struttura, ne mitiga la risposta in ampiezza e accelerazione. Tra le varie tipologie presenti nella letteratura di riferimento sono stati scelti i TLD cilindrici, che hanno il pregio dell'indipendenza dalla direzione di sollecitazione.

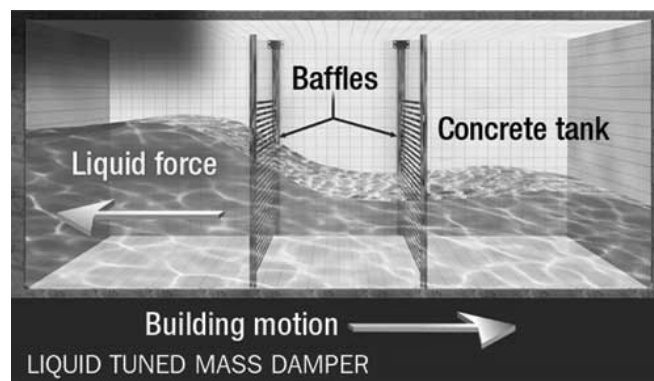


Figura 1. Schema del meccanismo di funzionamento del TLD.

Gli studi sulle applicazioni dei TLD nel campo delle costruzioni civili partono dalla fine degli anni Ottanta. I pionieri, spinti dai precedenti studi nell'ambito dello smorzamento di azioni parassite nei veicoli spaziali (Abramson, 1966), proposero l'applicazione di sistemi passivi a massa liquida anche agli edifici, in particolare le torri, suscettibili all'azione del vento. Welt ha proposto (Welt & Modi, 1987) uno studio sperimentale su serbatoi anulari, chiamati "nutation dampers", i primi a essere testati, derivando le prime forme dalle geometrie elaborate per veicoli spaziali, analoghi ai TLD convenzionali: era previsto un meccanismo di dissipazione di energia tramite l'assunzione di flusso potenziale con una condizione non lineare di superficie libera e una correzione per lo strato liminare.

Nello stesso periodo un altro studio (Shimizu & Hayama, 1987) basato sulla shallow water wave theory (Stoker, 1957) ha proposto un metodo numerico per derivare la risposta non-lineare di un liquido in una vasca rettangolare sottoposto ad oscillazioni orizzontali. È tuttavia il lavoro di Lepelletier (Lepelletier & Raichlen, 1988) il riferimento per la trattazione di onde non-lineari all'interno di una vasca rettangolare.

Tamura (Tamura et al., 1988 e 1992) riporta i risultati di installazioni di TLD per il controllo di vibrazioni su edifici alti e torri aeroportuali.

All'inizio degli anni Novanta è stato sviluppato (Sun et al., 1992) un modello non-lineare supportato da test su tavola vibrante: la totalità degli esperimenti rivela da subito un comportamento fortemente non-lineare con l'aumentare dell'ampiezza della forzante, effetti delle armoniche superiori dello sloshing attorno alla risonanza ed un comportamento di tipo hardening-spring con un improvviso jump-down delle frequenze immediatamente successive a quella di risonanza. A questo punto appare chiaro che qualsiasi studio che prendesse in considerazione solo il modello lineare sarebbe stato affetto da errori di approssimazione, trascurabili solo a condizione di un interesse ristretto a un range di frequenze nell'intorno di quella risonante. Inoltre senza tener conto del fenomeno del wave-breaking le forzanti di tipo impulsivo o sismico non possono esser prese in esame. In caso di rottura d'onda, la simulazione sovrastima sia la forza di reazione sia l'innalzamento del liquido alle pareti, sottostimando invece la dissipazione di energia.

È stato anche elaborato (Sun et al., 1995) un modello di TLD linearizzato i cui parametri di progetto possono esser calcolati tramite analogia con un TMD, rendendo applicabile anche da parte dei progettisti questa tipologia di smorzatore.

Un migliore modello predittivo, proposto alla fine degli anni Novanta (Yu, 1997; Reed et al., 1998), ha impiegato il metodo random-choice nella risoluzione delle equazioni non-lineari per piccole altezze di liquido in un TLD rettangolare. Il modello coglie adeguatamente il fenomeno del wave-breaking, per la maggior parte del range di frequenze e ampiezze di casi reali.

I vari TLD studiati nel corso degli anni presentano una grande variabilità nella geometria, dagli anelli toroidali ai contenitori rettangolari o circolari (Abramson, 1966); possono contenere dispositivi interni quali schermi (baffles), piani inclinati di varia natura (Modi & Akinturk, 2002) o corpi in sospensione all'interno del liquido (Fediw et al., 1995), tutti atti a variare la viscosità dello stesso.

2. MODELLO DI HOUSNER

L'idrodinamica alla base del funzionamento dei TLD è abbastanza complessa. Comunque, per piccole ampiezze di oscillazione, quali quelle derivanti dalla forzante eolica, il regime di sloshing del liquido può esser assunto con buona approssimazione come lineare e la rottura d'onda può considerarsi scongiurata. Anche sotto ampiezze di oscillazione più elevate la teoria lineare può essere utilizzata purché la prima frequenza di oscillazione del liquido sia ben accordata su quella strutturale.

Per ricondursi ad un modello di smorzatore implementabile in un programma FEM, nel presente lavoro è stato scelto il modello di Housner (Housner, 1963).

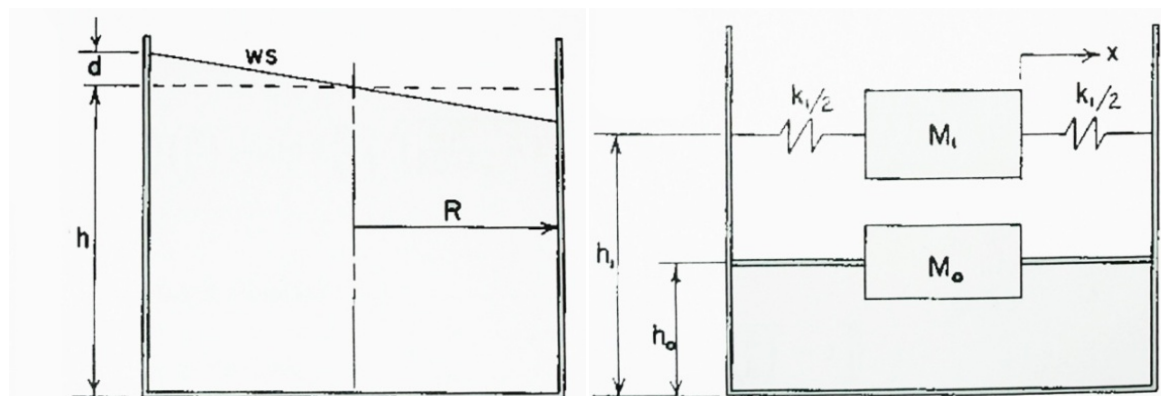


Figura 2. Schema parametri di riferimento del modello di Housner (Housner, 1963).

Dopo il terremoto cileno del 1960 molti serbatoi elevati da terra subirono crolli o seri danneggiamenti, altri no; iniziò così lo studio del fenomeno dello sloshing applicato a tale tipo di strutture. Difatti, se è corretto considerare un serbatoio completamente pieno o completamente vuoto alla stregua di una massa aggiunta, in campo dinamico la risposta della struttura fa sì che il serbatoio stesso diventi essenzialmente equivalente a due masse in moto relativo. Si considera così una massa impulsiva (M_0), che si muove solidale con la base ed è quindi in quiete rispetto al serbatoio, e una massa convettiva (M_1) che, ancorata tramite un vincolo elastico alle pareti del serbatoio, si muove relativamente a quest'ultimo.

Una delle ipotesi di Housner prevede che non ci sia mai rottura d'onda poiché la superficie libera è supposta mantenersi piatta e senza increspature.

Housner ha proposto come parametri di progetto per serbatoi circolari:

$$M_1 = M \cdot 0,6 \cdot \frac{\tanh\left[1,8 \cdot \left(\frac{h}{R}\right)\right]}{1,8 \cdot \left(\frac{h}{R}\right)} \quad (1)$$

$$h_0 = \frac{3}{8} \cdot h \cdot \left\{ 1 + \alpha \left[\left(\frac{M}{M_1} \right) \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

$$h_1 = h \cdot \left[1 - 0,85 \cdot \left(\frac{M}{M_1} \right) \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 0,56 \cdot \beta \cdot \frac{R}{h} \sqrt{\left(\frac{M \cdot R}{3 \cdot M_1 \cdot h} \right)^2 - 1} \right] \quad (3)$$

$$k_1 = 5,4 \cdot \frac{M_1^2}{M} \cdot \frac{g \cdot h}{R^2} \quad (4)$$

$$T_w = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{M_1}{k_1}} \quad (5)$$

con $\alpha = 1,3$; $\beta = 2,0$; T_w = periodo di vibrazione del liquido ; M = massa totale del liquido, mentre gli altri parametri geometrici sono indicati in Fig.2.

2.1 Validazione del modello

A causa della sensibilità del sistema smorzatore-struttura nei confronti dell'accordatura della frequenza del liquido si è reso necessario un confronto sui periodi di sloshing determinati tramite una formulazione più accurata, la SWWT (Shallow Water WaveTheory). Tenendo quindi conto che in questo caso le frequenze di sloshing si determinano rispettivamente tramite le relazioni sottostanti, i risultati del confronto sono riportati in Fig.3, in funzione del parametro h/R :

$$f_w = 1/T_w \quad (6)$$

$$f_{w,SWWT} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi g}{R} \tanh\left(\frac{\pi h_0}{R}\right)} \quad (7)$$

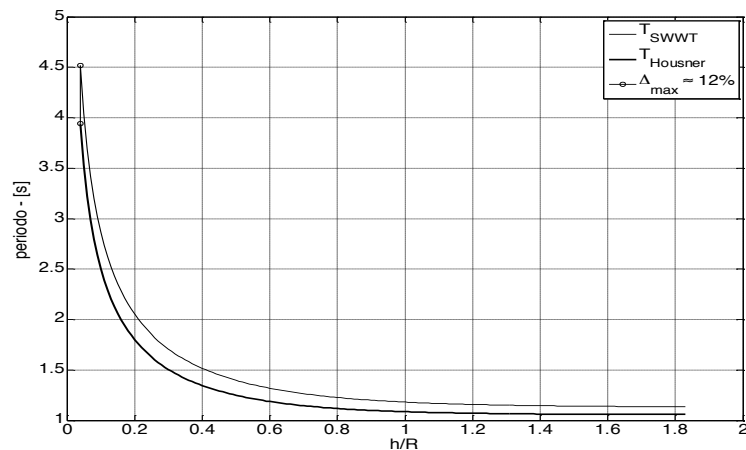


Figura 3. Confronto fra i periodi determinati con la teoria di Housner e la SWWT, al variare del parametro h/R .

Poiché la variazione tra le due formulazioni conduce ad errori massimi pari al 12%, si può assumere come accettabile l'approssimazione, almeno dal punto di vista delle applicazioni pratiche.

3. ANALISI DEI SEGNALI DI GALLERIA

A titolo di esempio nel presente lavoro è stata analizzata la risposta della Torre Garibaldi, in fase di completamento nell'area Porta Nuova di Milano. L'edificio è stato oggetto di una campagna sperimentale nella galleria del CRIACIV (Borri *et al.*, 2007).

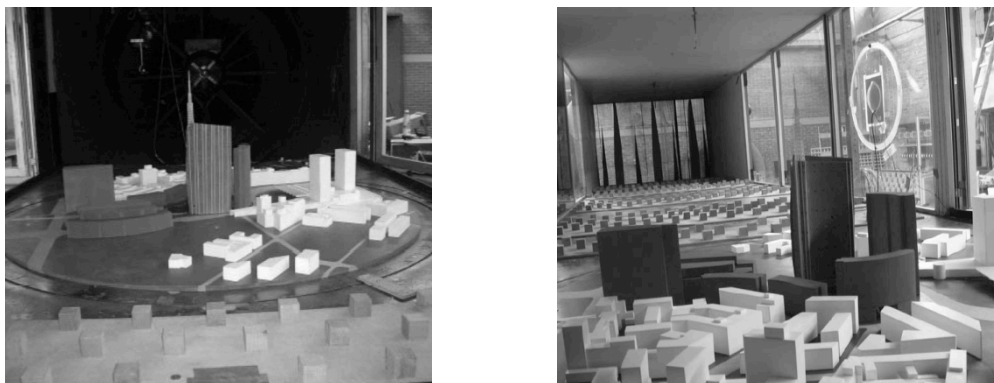


Figura 4.a-b. Immagini del modello nella galleria del vento del CRIACIV a Prato.

Sono state eseguite misure di pressione in campo dinamico, su un modello in scala 1:350 dell'edificio; le misure di pressione sono state successivamente integrate sulla superficie di pertinenza per ottenere le forzanti di piano (F_x , F_y , M_z) relative agli allineamenti inseriti nel modello di galleria (sette livelli). Le storie temporali, acquisite a una frequenza di campionamento di 250 Hz, sono rappresentate da segnali con contenuto in frequenza fino a 125 Hz (0.408 Hz in scala reale). Essendo già la quinta frequenza strutturale di 0.45 Hz, il contenuto in frequenza del segnale campionato risulta insufficiente ad eccitare un numero di modi adeguato a caratterizzare in maniera soddisfacente la risposta dinamica della struttura. È stato quindi utilizzato un procedimento che ha permesso l'estensione del segnale in frequenza e l'eventuale estrapolazione dello spettro.

3.1 Estensione dei segnali di galleria

La procedura consiste nella modellazione dello spettro delle forzanti di piano partendo dalla struttura di covarianza del segnale registrato attraverso una stima non parametrica mediante FFT (periodogramma). Tale metodo per la stima del tensore spettrale dovrebbe essere

applicato, a rigore, soltanto su segnali che presentino una PDF gaussiana, ma si applica spesso anche ad altre forme di segnali con errori trascurabili nel caso in cui non si discostino eccessivamente dalla distribuzione gaussiana. Nella fattispecie la procedura è stata applicata a segnali precedentemente gaussianizzati mediante trasformazione statica non lineare (ad es. Gioffré *et al.*, 2000), ma che comunque si avvicinano molto a questo tipo di distribuzione.

Il procedimento consente di estendere in frequenza il segnale in ingresso, generando le nuove storie di vento tramite un filtro autoregressivo; un ulteriore controllo sui risultati, in aggiunta cioè al confronto tra segnale generato e iniziale, viene dallo spettro teorico del modello AR.

I passi del procedimento prevedono, dopo la già citata gaussianizzazione dei singoli segnali, la standardizzazione degli stessi e la determinazione del tensore spettrale dei segnali per ogni angolo incidente di vento (tre componenti di forzante su ciascuno dei sette livelli di prese). Per ottenere una stima più affidabile della densità spettrale, si mediano gli spettri calcolati su più finestre temporali.

Ricavata mediante IFFT la struttura di covarianza dei segnali gaussianizzati, attraverso un'interpolazione con spline cubica delle funzioni di auto e cross-covarianza è stato operato un sostanziale ricampionamento: si passa da un intervallo di campionamento di 0.004 s ($1/f_c = 1/250$ Hz), ad uno di 0.0005 s ($1/f_{cg} = 1/2000$ Hz).

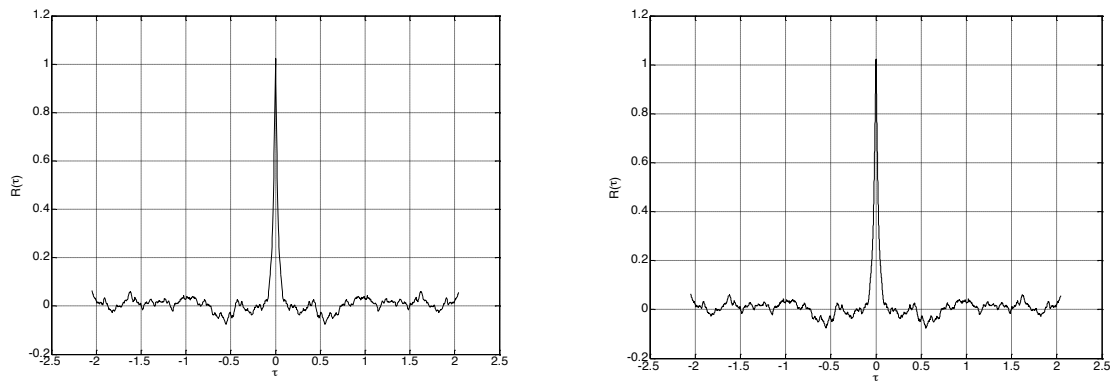


Figura 5.a-b. Confronto fra funzioni di autocovarianza del segnale: a sinistra quella del segnale registrato, a destra quella interpolata su più punti.

La procedura delineata è stata sviluppata in ambiente Matlab®; partendo dalla struttura di covarianza del segnale esteso e scegliendo l'ordine del filtro più adatto, è possibile ricavare l'ipermatrice dei coefficienti del filtro AR e la matrice di covarianza del rumore.

3.2 Modellazione autoregressiva

La bontà dell'estensione è stata valutata con due diversi criteri: il primo criterio confronta l'espressione teorica della densità spettrale del modello AR con le stime delle densità spettrali dei segnali gaussianizzati al fine di determinare l'ordine del filtro auto regressivo. Successivamente, vengono stimati anche gli spettri delle simulazioni numeriche dei segnali per controllare la bontà del generatore di numeri aleatori.

Il filtro autoregressivo utilizzato può essere espresso nella forma consueta

$$\mathbf{y}(k\delta t) = \sum_{h=1}^p \mathbf{B}^{(h)} \mathbf{y}[(k-h)\delta t] + \mathbf{w}(k\delta t) \quad (8)$$

Nella modellazione puramente autoregressiva (ovvero senza considerare alcuna media mobile), si stimano le matrici dei coefficienti $\mathbf{B}^{(h)}$ tali che il vettore \mathbf{y} al generico istante $k\delta t$ sia una combinazione lineare dello stesso vettore, registrato però agli istanti precedenti. Nella (8) δt rappresenta l'intervallo di campionamento del segnale, e $\mathbf{w}(\delta t)$ è l'errore commesso nel sostituire a $\mathbf{y}(\delta t)$ la combinazione lineare dei vettori registrati agli intervalli precedenti. Le matrici $\mathbf{B}^{(h)}$ sono calcolabili attraverso la soluzione del sistema lineare di Yule-Walker,

partendo dalla struttura di correlazione dei segnali; una volta effettuata tale stima la densità di potenza spettrale dei segnali $y(t)$ è data dalla relazione:

$$S_{yy}(f) = Q^{-1}(f) S_{ww}(f) Q^{-h}(f) \quad (9)$$

dove

$$Q(f) = Id - \sum_{h=1}^p B^{(h)} \exp(2i\pi f \delta t) \quad (10)$$

Nel grafico riferito all'auto-spettro (Fig.6.a, 7), l'AR teorico si accorda bene con le stime dei segnali gaussianizzati fino ai 125 Hz, perciò l'ordine del filtro adottato sembra adeguato; a frequenze più alte si nota una discrepanza fra l'espressione teorica dello spettro del filtro autoregressivo e la stima dello spettro delle simulazioni, essendo quest'ultima maggiore. Questo fenomeno è dovuto essenzialmente a questioni legate alla stima della potenza spettrale di un rumore non bianco di lunghezza finita; per approfondimenti si rimanda ad es. a Percival & Walden, 1993. La differenza appare ancora più evidente nel cross-spettro (Fig.6.b, 8), anche nel range 0-180 Hz.

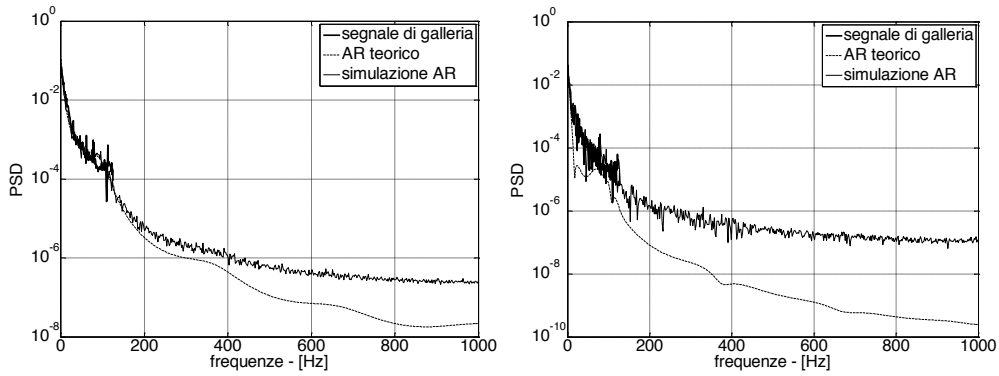


Figura 6.a-b. Controllo risultati auto-spettro [1-1] (sinistra) e cross-spettro [2-13] (destra), ang = 0°.

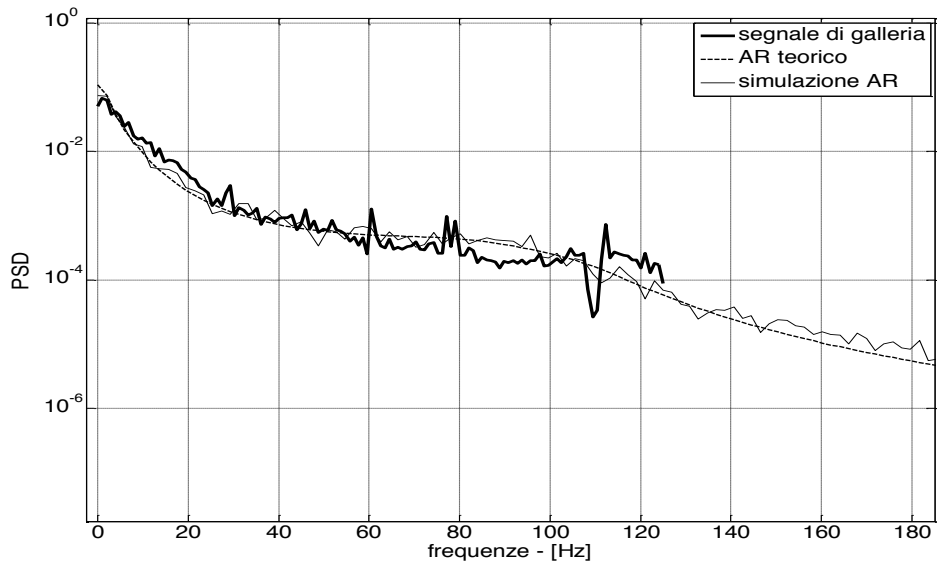


Figura 7. Auto-spettro [1-1]: zoom nel range 0-180 Hz per una lettura più chiara delle curve sovrapposte.

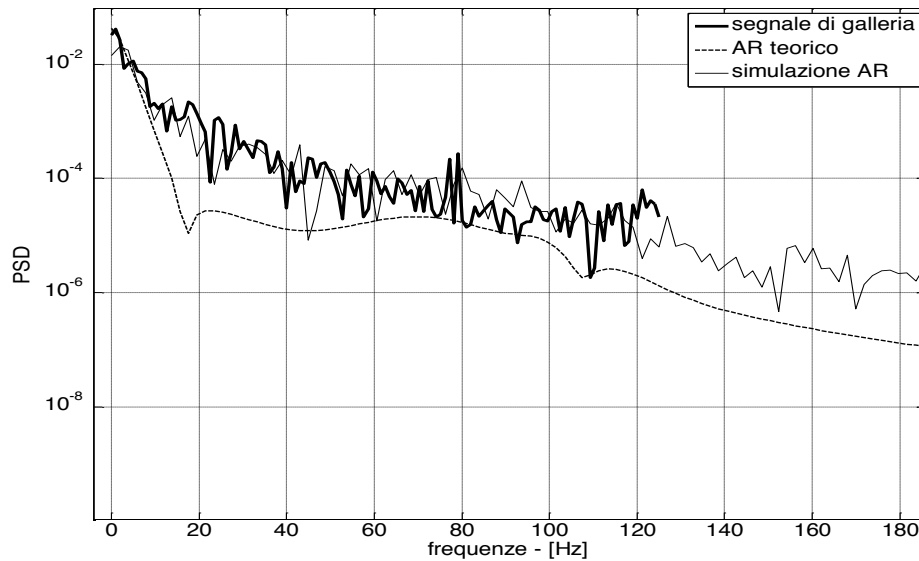


Figura 8. Cross-spettro [2-13]: zoom nel range 0-180 Hz per una lettura più chiara delle curve sovrapposte.

In riferimento alle didascalie delle Fig.6-7-8 è opportuno chiarire che i numeri identificativi di auto e cross-spettri si riferiscono agli indici dell'ipermatrice spettrale ottenuta correlando le 3 forzanti (F_x , F_y , M_z) calcolate sui 7 livelli di prese di pressione del modello, per un totale di 21 segnali ($F_{x,1-7}$, $F_{y,1-7}$, $M_{z,1-7}$). L'esempio in figura sette si riferisce così al cross-spettro relativo ad F_x sul 2° livello e F_y sul 6° livello di prese.

L'ultimo passo consiste nel de-gaussianizzare il segnale ottenuto, tramite la trasformazione statica inversa; già un polinomio di secondo grado approssima bene la curva del segnale gaussianizzato che, come detto in precedenza, era di per sé vicino alla gaussianità.

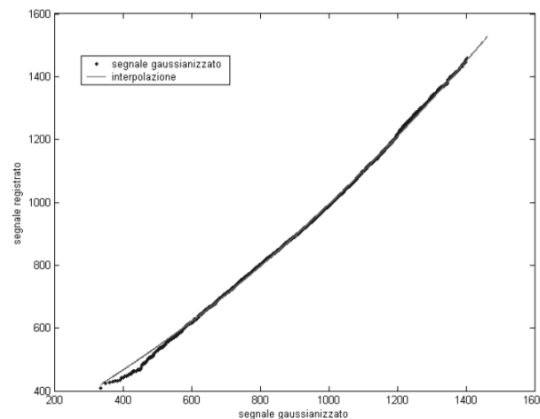


Figura 9. De-gaussianizzazione dei segnali (originale e ricostruito), con approssimazione polinomiale di 2° grado.

4. ANALISI DINAMICA E RISULTATI

L'analisi dinamica fa uso delle storie temporali delle forzanti di piano generate col metodo descritto in precedenza, assegnate alla struttura in un modello agli elementi finiti (Fig.10.a). Sono stati analizzati cinque modelli diversi:

Tabella1. Descrizione modelli realizzati.

MOD 1	struttura senza TLD
MOD 2	struttura con TLD e fattore di massa = 1%
MOD 2a	struttura con TLD e fattore di massa = 1.5%
MOD 2b	struttura con TLD e fattore di massa = 2%
MOD 3	struttura con TLD (fattore di massa = 1%) e detuning

Il MOD3 è stato realizzato accordando sulla prima frequenza propria l' 80% di massa convettiva di liquido e due quote del 10% su frequenze rispettivamente pari alla principale incrementata e diminuita del 5%. Questo ha permesso di agire su una range di frequenze più ampio. Le masse liquide di minore entità non sono state accordate sulle altre frequenze proprie della struttura per prendere in considerazione un certo grado di incertezza legato alla modellazione della struttura e quindi alla determinazione della frequenza propria. Il complesso struttura-smorzatore è stato realizzato inserendo un TMD equivalente a TLD cilindrici con raggio R e altezza del liquido interno pari rispettivamente a 0.5 m e 2 cm. Dal momento che per attivare una massa di liquido adeguata è necessario allocare un numero altissimo di TLD è stata ipotizzata per ogni modello una disposizione realistica degli stessi sul piano dell'edificio ipoteticamente dedicato alla funzione (Fig.10.b in alto). Per la determinazione dell'inerzia rotazionale del piano destinato alla collocazione degli smorzatori, ogni gruppo di TLD è stato ipotizzato agire nel baricentro delle porzioni di solaio individuate dalla maglia strutturale (Fig.10.b in basso).

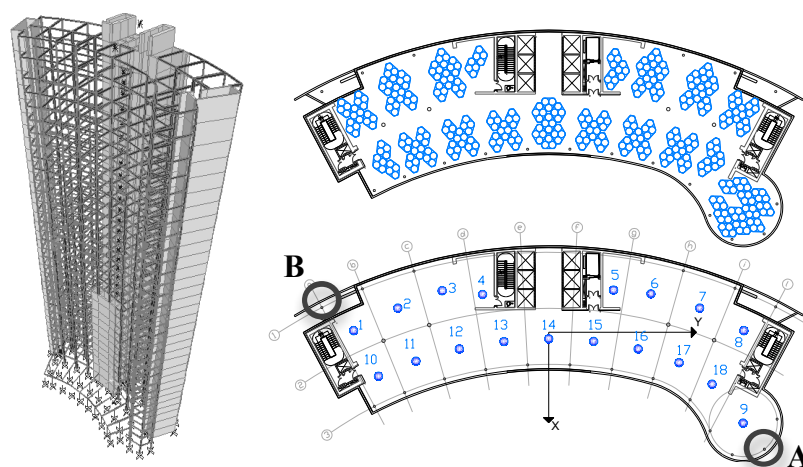


Figura 10. (sinistra - a) modello computazionale della struttura; (destra - b) localizzazione realistica (sopra) ed ideale (sotto) dei gruppi di TLD ideali, ed indicazione delle pilastrate più sollecitate.

Le analisi svolte sono relative al comfort interno. Questo significa che l'obiettivo è il raggiungimento di un alto livello di performance, e per la determinazione delle soglie di accelerazione è stato fatto riferimento alla norma CNR-DT 207/2008 (CNR, 2008). La norma fornisce tre tipi di valori di riferimento di accelerazione: valori limite in direzione longitudinale e trasversale, limiti per l'analisi di abitabilità e relazioni per il calcolo dei limiti di accelerazione in punti diversi dal centro di torsione. Avendo condotto l'analisi con storie temporali sul modello FEM della struttura il software restituisce i valori effettivi di accelerazione in ogni punto della struttura ed è quindi possibile trascurare le soglie relative al terzo punto; saranno utilizzate per i punti più sollecitati le soglie determinate con i primi due (Tab.2).

Tabella2. Soglie di accelerazione ricavate per la struttura in esame da CNR-DT 207/2008.

	frequenza		a _{max} (uffici)			soglie di percezione				
longitudinale	0.271	Hz	0.12	m/s ²	% utenti	10	30	50	70	90
trasversale	0.253	Hz	0.13	m/s ²	a _s	0.0225	0.034	0.042	0.055	0.079

In merito alla lettura della risposta strutturale del MOD1 sono state prese a riferimento le pilastrate di estremità più sollecitate (Fig.9.b).I risultati qui riassunti (Fig.10) riguardano il MOD2a e MOD3, poiché risultati i più efficienti tra i quattro modelli dotati di smorzamento.

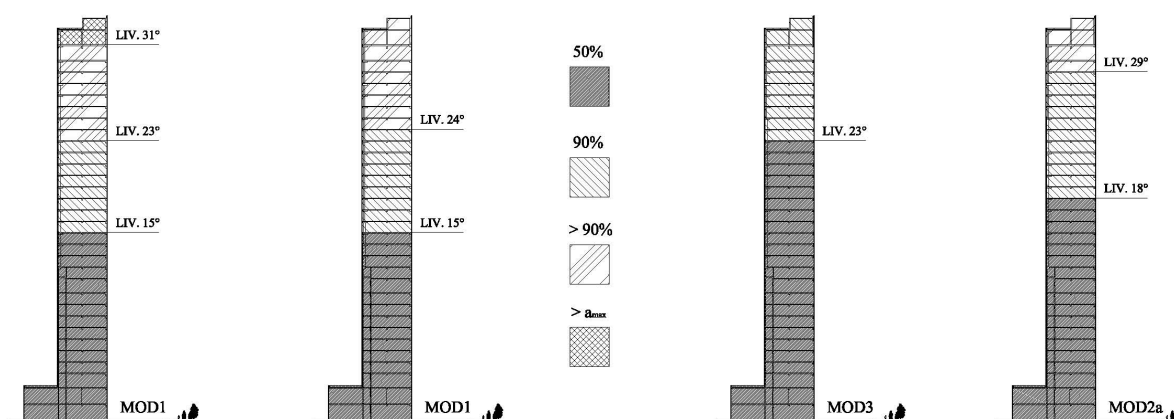


Figura 11. A sinistra: i due schemi, entrambi relativi al MOD1, rappresentano le quote in corrispondenza delle quali vengono superate le soglie di abitabilità scelte ed indicate al centro; la prima è relativa alla pilastrata B, la più sollecitata, la seconda alla pilastrata A (Figura 10.b). A destra: situazioni relative a MOD3 e MOD2a per la pilastrata B.

Appare evidente come l'edificio senza smorzamento presenti valori di accelerazione di piano incompatibili con le funzioni ad esso connesse, in quanto nella maggior parte dei piani della torre si supera la soglia di comfort relativa al range 50-90% degli utenti che ne risentono. Per quanto riguarda i picchi di accelerazione di piano, i modelli smorzati le abbattano rispettivamente di circa il 28% (MOD2a) e 47% (MOD3). La maggior efficienza del MOD3 è evidenziata dal fatto che solo la seconda soglia è superata in corrispondenza del 23° livello.

I risultati dell'analisi di comfort vengono ribaditi nell'analisi della risposta in frequenza; dalla disamina dei grafici contenuti in Fig.12-13 è possibile fare alcune considerazioni sull'efficienza del sistema di smorzamento. Nella risposta along-wind il comportamento è qualitativamente identico anche se nel MOD2a il picco maggiore di 1 relativo all'inefficienza raggiunge valori molto più elevati rispetto al MOD3, fatto che non comporta problemi poiché la frequenza prossima a tale picco è quella che agisce in direzione across-wind. È proprio in direzione across-wind che la differenza fra i due modelli si rende evidente: le prime due frequenze proprie, nel grafico relativo al MOD3, ricadono all'interno del picco minore di 1 della curva relativo all'efficienza, cosa che non accade nel caso del MOD2a dove la seconda frequenza propria, relativa proprio al moto strutturale in direzione across-wind, intercetta la curva di risposta in frequenza in corrispondenza di un valore maggiore di 1, rappresentando uno smorzamento negativo per la struttura.

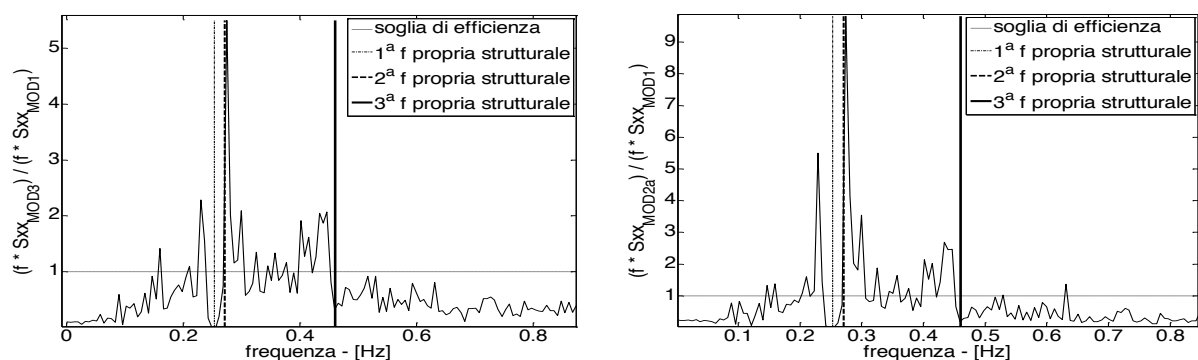


Figura 12. Curve di risposta in frequenza in direzione along-wind dell nodo più sollecitato per MOD3 (sinistra) e MOD2a (destra).

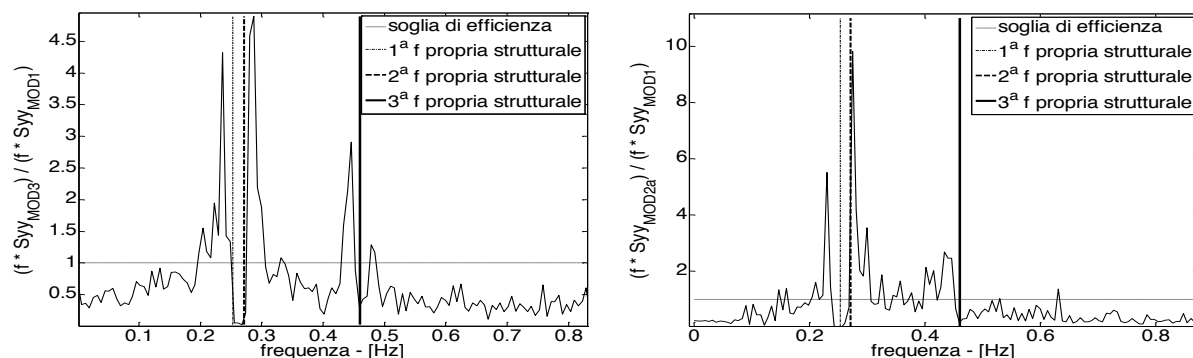


Figura 13. Curve di risposta in frequenza in direzione across-wind del nodo più sollecitato per MOD3 (sinistra) e MOD2a (destra).

5. CONCLUSIONI

È stato presentato un possibile percorso progettuale finalizzato all'impiego di un sistema di smorzamento efficiente e non convenzionale, soprattutto se si pensa che i pochi esempi di installazioni si sono realizzati soltanto nel continente americano ed asiatico. A discapito delle evidenti approssimazioni insite nella procedura (teoria di Housner per riprodurre l'idrodinamica del fenomeno ed assunzione dell'applicabilità di tale teoria ad oggetti tanto diversi in forma e funzione), vanno evidenziate le qualità di tale sistema di smorzamento che unisce ai contenuti costi di installazione e manutenzione un'alta efficienza.

L'aspetto più interessante risulta essere il detuning, che, se ottimizzato, potrebbe portare a risultati estremamente validi.

BIBLIOGRAFIA

- Kwok K.C.S. (1991). Damping and control of structures subjected to dynamic loading. In *Structures Subjected to Dynamic Loading - Stability and Strength* (eds. R. Narayanan, T. M. Roberts), London: Elsevier Applied Science, pp. 303-334
- Abramson H.J. (1966). *The dynamics behavior of liquids in moving containers*. NASA Rep.SP-106
- Welt F., Modi V.J. (1987). *On the control of instabilities in fluid-structure interaction problems*. IFAC Proceedings series, n 3, 1987, p 115-120
- Shimizu T., Hayama S., 1987. Nonlinear responses of sloshing based on the shallow water wave theory. *Japan Society Mechanical Engineering (JSME)*, Vol. 30(263), pp. 806-813
- Stoker J.J., (1957). *Water waves: The Mathematical Theory with Applications*. Interscience Publishers, New York
- Lepelletier T.G., Raichlen F. (1988). Nonlinear oscillations in rectangular tanks. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 114(1), pp. 1-23
- Tamura, Y., Fujii, K., Sato, T., Wakahara, T., Kosugi, M. (1988). Wind-induced vibration of tall towers and practical application of tuned sloshing damper. *Proceedings of the Symposium/Workshop on Serviceability of Buildings (Movements, Deformations, Vibrations)*. National Research Council of Canada. Vol. 1, pp. 228-241
- Tamura, Y., Kousaka, R., Modi V. J. (1992). Practical application of nutation damper for suppressing wind-induced vibrations of airport towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (JWEIA)*, Vol. 43(1-3), pp. 1919-1930
- Sun L.M., Fujino Y., Pacheco B.M., Chaiseri, P. (1992). Modelling of tuned liquid damper (TLD). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (JWEIA)*, Vol. 43(3), pp. 1883-1894
- Sun L.M., Fujino Y., Chaiseri P., Pacheco B.M. (1995). Properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 24(7), pp. 967-976
- Yu J.K. (1997). *Nonlinear characteristics of Tuned Liquid Dampers*. PhD Thesis, University of Washington
- Reed D., Yu J.K., Yeh H., Gardarsson S. (1998). Investigation of Tuned Liquid Dampers under large amplitude excitation. *Journal of Engineering Mechanics - ASCE*, Vol. 124(4), pp. 405-413

- Housner G.W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bullettin of Seismological Society of America (BSSA)*, Vol. 53(2), pp. 381-387
- Casciati F., De Stefano A., Matta E. (2003). Simulating a conical tuned liquid damper. *Simulating Modelling Practice and Theory*, No.11, pp. 353-370
- Modi V.J., Akinturk A. (2002). An efficient liquid sloshing damper for control of wind-induced instabilities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (JWEIA)*, Vol. 57(2-3), pp. 1907-1918
- Fediw A.A., Isyumov N., Vickery B.J. (1995). Performance of a tuned sloshing water damper. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (JWEIA)*, Vol. 90(12-15), pp. 237-247
- Borri C., Bartoli G., Borsani A., Majowiecki M., Pastò S., Procino L., Spinelli P. (2007). Indagini sperimentali in galleria del vento su edifici a torre. In *“Ingegneria del Vento in Italia”*, Atti del nono Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento IN-VENTO-2006, a cura di D’Asdia P., Sepe V., Febo S., 103-109
- CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), (2008). CNR-DT 207/2008: Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, Roma
- Massai T. (2009). Attenuazione della risposta indotta dal vento su edifici alti tramite l’impiego di smorzatori a massa liquida: un caso di studio. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Firenze. Relatori: Bartoli G., Facchini L., Borri C., Spinelli P.
- Gioffré M., Gusella V., Grigoriu M. (2000), Simulation of non-Gaussian field applied to wind pressure fluctuations, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 15, pp. 339-345
- Percival D. B., Walden A. T. (1993), *Spectral Analysis for Physical Applications*, Cambridge University Press, Cambridge 1993